

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ МОМЕНТОВ И ТОКОВ РОЛЬГАНГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. В. КОНОНЕНКО, Б. А. ДАНЧИНОВ

Рольганговые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии АР предназначены главным образом для индивидуального привода роликов рабочих и транспортных рольгангов металлургических предприятий. В соответствии с требованиями технологического процесса прокатки и транспортировки металла они работают в режиме частых пусков, реверсов, торможений, сопровождающихся переходными процессами. При этом вращающие моменты и токи кратковременно могут достигать значительных величин.

Знание хотя бы ориентировочных значений ударных токов и моментов, развиваемых рольганговыми двигателями при пусках и реверсах, имеет практическое значение для оценки надежности приводов рольгангов. Кроме того, спецификой приводов рольгангов является ограничение по величине максимальных ускорений, обусловленное недопустимостью пробуксовки роликов относительно прокатываемого или транспортируемого металла. Знание максимального переходного момента дает возможность судить о величине максимального ускорения.

В ряде работ [1—5] даются приближенные формулы для определения максимальных переходных моментов асинхронных двигателей общепромышленного исполнения. Наиболее простые для расчетов формулы приведены в [1, 2, 5]. Однако они имеют некоторые ограниченные области их применения. В частности, приведенная в [1] формула справедлива при  $\alpha'_s + \alpha'_r \leq 0,7$ , где  $\alpha'_s$  ( $\alpha'_r$ ) — коэффициент затухания статорной (роторной) обмотки при замкнутой роторной (статорной). Для рольганговых же двигателей  $\alpha'_s + \alpha'_r > 1$ .

По формуле К. П. Ковача и И. Раца [2] отношение максимального переходного момента к установившемуся пусковому всегда больше двух. В действительности же могут быть случаи, когда это отношение оказывается меньше двух.

По формуле, приведенной в [5], максимальный момент определяется лишь индуктивными сопротивлениями двигателя и не зависит от активных сопротивлений, хотя известно, что влияние активных сопротивлений двигателя на максимальный момент весьма существенно. Например, при включении в цепь статора добавочных активных сопротивлений момент значительно уменьшается.

Формула максимального момента в [3] выведена для случая заранее учтенного времени достижения переходным моментом своего максимума. Это время принято равным  $\frac{3}{2}\pi$  электрических радиан, что соответствует для двигателей общепромышленного исполнения.

Определение максимального момента по [4] требует довольно трудоемкого вычисления коэффициентов затухания свободных составляющих переходного момента. Кроме того, необходимо знать время  $t_m$  достижения переходным моментом максимального значения. Ошибка в определении  $t_m$  ведет к погрешности при вычислении  $M_{\max}$ . Предлагаемый автором способ графического определения максимального момента из кривой  $M_{\max} = f(t_m)$  увеличивает трудоемкость расчетов.

В связи с изложенным выше возникает задача найти относительно простой способ определения максимальных переходных токов и моментов конкретно для рольганговых двигателей серии АР.

При определении максимальных токов и моментов необходимо учитывать электромагнитные переходные процессы.

Электрохимические переходные процессы в асинхронном короткозамкнутом двигателе в относительных единицах в синхронно вращающихся осях описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} p \psi_{s\alpha} &= U_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha} + \psi_{s\beta}; \\ p \psi_{s\beta} &= U_{s\beta} - r_s i_{s\beta} - \psi_{s\alpha}; \\ p \psi_{r\alpha} &= -r_r y_s \psi_{r\alpha} + r_r y_m \psi_{s\alpha} + \psi_{r\beta} - \omega \psi_{r\beta}; \\ p \psi_{r\beta} &= -r_r y_s \psi_{r\beta} + r_r y_m \psi_{s\beta} - \psi_{r\alpha} + \omega \psi_{r\alpha}; \\ i_{s\alpha} &= y_r \psi_{s\alpha} - y_m \psi_{r\alpha}; \\ i_{s\beta} &= y_r \psi_{s\beta} - y_m \psi_{r\beta}; \\ i_s &= \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}; \\ p \omega &= \frac{1}{J_\Sigma} (M - M_c), \end{aligned}$$

где

$$M = \frac{3}{2} y_m (\psi_{r\alpha} \psi_{s\beta} - \psi_{s\alpha} \psi_{r\beta});$$

$$y_s = \frac{x_s}{x_s x_r - x_m^2};$$

$$y_r = \frac{x_r}{x_s x_r - x_m^2};$$

$$y_m = \frac{x_m}{x_s x_r - x_m^2}.$$

В этих выражениях приняты обозначения:

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$  — составляющие вектора напряжения статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  
 $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$  ( $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ ) — составляющие вектора потокосцеплений статора (ротора) по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  — составляющие вектора тока статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$i_s$  — результирующий вектор тока статора;

$r_s$  ( $r_r$ ) — активное сопротивление статора (ротора);

$x_s$  ( $x_r$ ) — полное индуктивное сопротивление статора (ротора);

$x_m$  — индуктивное сопротивление взаимоиндукции;

$\omega$  — угловая скорость ротора;

$M$  — вращающий момент двигателя;

$M_c$  — момент сопротивления нагрузки;

$J_\Sigma$  — приведенный к валу двигателя момент инерции;

$t$  — время;

$p = \frac{d}{dt}$  — символ дифференцирования по времени.

Как видно из этой системы уравнений, количественный и качественный характер протекания электрохимических переходных процессов определяется параметрами двигателя ( $r_s, r_r, y_s, y_r, y_m$ ) и привода ( $J_\Sigma, M_c$ ).



Ударные значения тока и момента, как показали проведенные исследования, практически не зависят от момента инерции (при  $J_{\Sigma} > 3J_{\text{рот}}$ ) и момента сопротивления нагрузки. Следовательно, величины ударных тока и момента будут определяться параметрами только двигателя.

В результате анализа параметров рольганговых двигателей установлено, что всю серию можно разбить на четыре группы. При этом в качестве критерия деления на группы следует принять параметры  $y_s$  и  $y_r$ . Диапазоны изменения этих параметров в пределах каждой группы приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Группа	I	II	III	IV
$y_s, y_r$	до 4	4÷5	5÷6	Свыше 6

Для определения  $i_{\text{уд}}$  и  $M_{\text{уд}}$  необходимо решить приведенную выше систему нелинейных уравнений. Аналитическое решение может быть получено при линеаризации этих уравнений, т. е. при постоянстве параметров и скорости вращения ротора. Такое решение при определении лишь ударных токов и моментов вполне приемлемо, однако даже при таких допущениях расчет является весьма трудоемким. Поэтому наиболее целесообразным следует признать решение нелинейной системы уравнений на АВМ.

В нашем случае расчеты  $M_{\text{уд}}$  и  $i_{\text{уд}}$  проводились на АВМ типа МН-14.

В качестве расчетных параметров  $y_s$ ,  $y_r$  и  $y_m$  принимались их усредненные для каждой группы значения. Активные сопротивления статорных и роторных обмоток изменялись в диапазоне возможных для данной группы значений. Приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции принимался равным  $3J_{\text{рот}}$  для двигателя, имеющего наибольший момент инерции ротора в данной группе. Момент сопротивления нагрузки принимался равным нулю ( $M_c = 0$ ).

В табл. 2 приведены расчетные параметры двигателей для каждой группы.

Т а б л и ц а 2

Группы	$y_s$	$y_r$	$y_m$	$r_s$	$r_r$	$J_{\Sigma}$
I	3,73	3,58	3,13	0,05÷0,3	0,2÷0,7	116
II	4,33	4,28	3,93	0,04÷0,15	0,2÷0,4	120
III	5,55	5,45	5,12	0,03÷0,1	0,1÷0,3	339
IV	6,21	6,16	5,85	0,03÷0,1	0,1÷0,3	351

Т а б л и ц а 3

Группы	Тип двигателя	$y_s$	$y_r$	$y_m$
I	AP 64-16	3,96	3,79	3,32
	AP 42-12	2,53	2,47	2,12
II	AP 52-8	4,83	4,72	4,46
	AP 74-16	4,18	4,0	3,58
III	AP 63-12	5,72	5,56	5,19
	AP 73-12	5,36	5,22	4,91
IV	AP 43-4	6,42	6,48	6,23
	AP 74-10	6,07	5,98	5,75

В результате проведенных расчетов были получены для каждой группы двигателей семейства универсальных кривых, выражающих зависимости ударных токов и моментов от параметров двигателей.

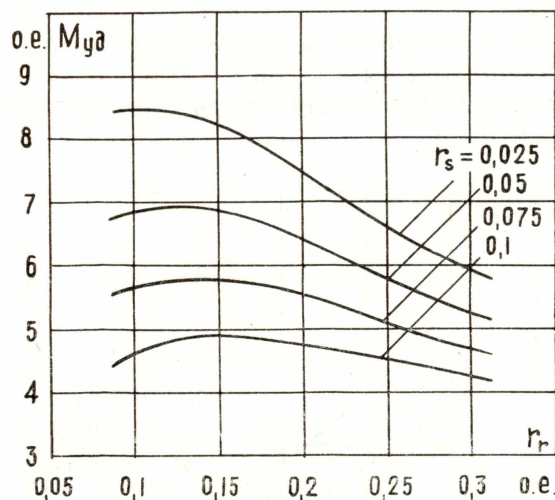


Рис. 1. Зависимости  $M_{уд}=f(r_s, r_r)$  при пуске.

Универсальность этих кривых заключается в том, что с их помощью можно определить  $M_{уд}$  и  $i_{уд}$  любых двигателей, имеющих примерно одинаковые значения параметров  $y_s$ ,  $y_r$ , и  $y_m$  и отличающихся активными сопротивлениями.

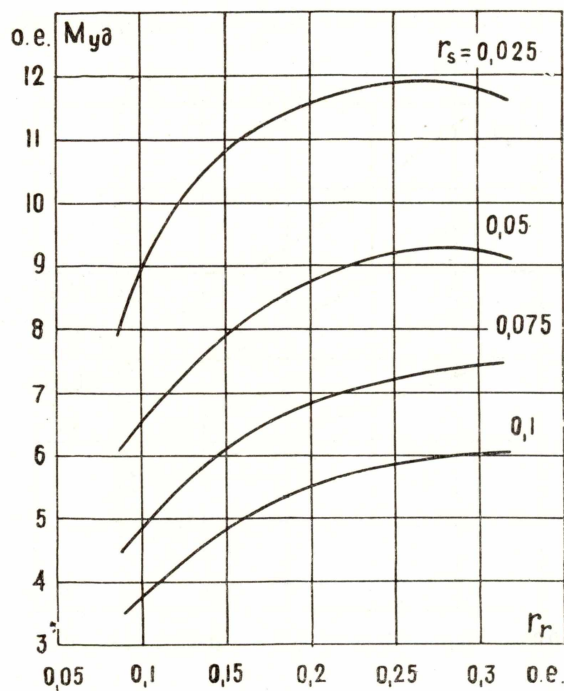


Рис. 2. Зависимости  $M_{уд}=f(r_s, r_r)$  при реверсе.

В качестве примера на рис. 1—4 приведены подобные кривые для IV группы.

Для оценки возможной погрешности были произведены поверочные расчеты для двигателей, имеющих наибольшие и наименьшие внутри каж-

дой группы значения параметров  $y_s$ ,  $y_r$  и  $y_m$  (которые приведены в табл. 3) при различных значениях активных сопротивлений  $r_s$  и  $r_r$ .

Установленные при этом максимальные погрешности приведены в табл. 4, из которой видно, что при пользовании универсальными кривыми они не превышают:

- а) при определении ударных моментов — 18%;
- б) при определении ударных токов — 10%.

Для чисто оценочных целей такие значения погрешностей можно считать вполне приемлемыми.

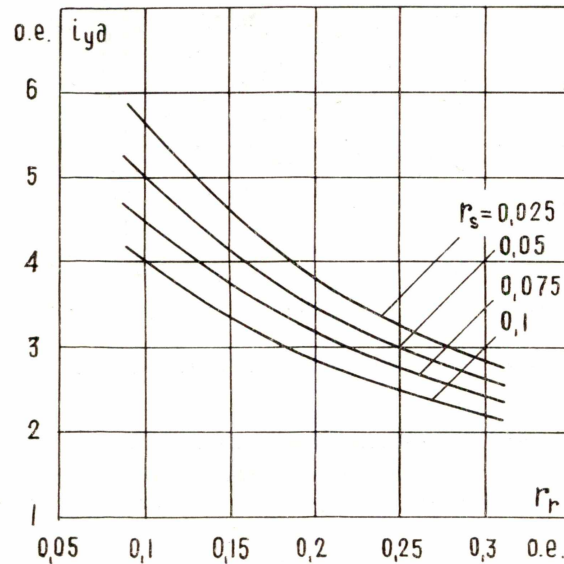


Рис. 3. Зависимости  $i_{yd}=f(r_s, r_r)$  при пуске.

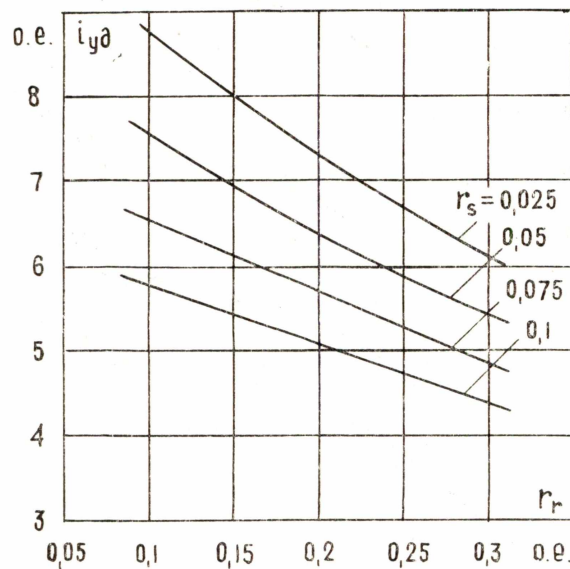


Рис. 4. Зависимости  $i_{yd}=f(r_s, r_v)$  при реверсе.

При определении ударных токов и моментов любого двигателя необходимо прежде всего определить значения параметров  $y_s$ ,  $y_r$ ,  $y_m$  и установить, к какой группе он относится. Далее по значениям активных сопротивлений  $r_s$  и  $r_r$  из кривых  $i_{yd} = f(r_s, r_r)$  и  $M_{yd} = f(r_s, r_r)$ , относящихся к группе данного двигателя, определяются  $i_{yd}$  и  $M_{yd}$ .



Таблица 4

Группы		I	II	III	IV
Пуск	$\Delta M_{уд} \%$	+8,3 —11,5	+14,3 —9,7	+3,56 —1,12	+1,98 —7,14
	$\Delta i_{уд} \%$	+8,6 —2,3	5,9 —9,15	+2,35 —5,4	+3,53 —1,06
Реверс	$\Delta M_{уд} \%$	+10,3 —11,2	+17,8 —15,2	+6,3 —0,96	+3,25 —8,7
	$\Delta i_{уд} \%$	+8,0 —2,06	+4,9 —3,64	+2,84 —1,27	+1,76 —3,1

Уместно заметить, что при определении параметров  $y_s$ ,  $y_r$  и  $y_m$  необходимо брать насыщенные значения индуктивных сопротивлений.

Следует также отметить, что максимальные токи и моменты при реверсе определены при условии, что за время между отключением и повторным включением с измененным порядком чередования фаз магнитное поле ротора успевает полностью затухнуть. Для рольганговых двигателей такое допущение вполне приемлемо [6].

Таким образом, используя полученные универсальные кривые, можно относительно просто и быстро установить ориентировочные значения максимальных токов и моментов любого рольгангового двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Шубенко. Некоторые вопросы динамики автоматизированных асинхронных электроприводов. «Электричество», 1960, № 1.
2. К. П. Ковач, И. Рац. Переходные процессы в машинах переменного тока. Госэнергоиздат, 1963.
3. Н. И. Зенкин, В. М. Кирпичников, Н. И. Томашевский, В. А. Шубенко, Н. Д. Ясенов. Расчет динамических и статических характеристик асинхронных двигателей при помощи АВМ. Изв. ВУЗ, Горный журнал, 1965, № 11.
4. Л. Б. Масандилов. О расчете максимальных переходных моментов асинхронного двигателя. «Электричество», 1968, № 11.
5. T. Jokinen. Transient torque in induction motors in the locked — rotor state. «Sahko», 1969, 42, № 3.
6. Е. В. Кононенко, Б. А. Данчинов. Пуск и реверс рольганговых двигателей при различной начальной скорости. Статья в настоящем сборнике.